

## **ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΕΝΙΣΧΥΣΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΑΝΔΥΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΡΑΒΔΩΝ ΚΑΙ ΤΡΟΠΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΤΟΥΣ**

**ΚΟΝΤΟΥ ΠΑΝΑΓΙΩΤΑ ΛΟΥΙΖΑ  
ΧΑΤΖΗΑΛΕΞΙΟΥ ΑΛΕΞΙΟΣ**

### **Περίληψη**

*Στην παρούσα εργασία γίνεται αναφορά στη χρήση μανδύων από σύνθετα υλικά κυρίως σε υποστυλώματα. Αρχικά παρουσιάζονται τα βασικά συστατικά που αποτελούν το σύστημα ενίσχυσης, τα πλεονεκτήματα και τα μειονεκτήματα των FRP, καθώς και ο τρόπος εφαρμογής των FRP μανδύων σε κατακόρυφα δομικά στοιχεία. Στη συνέχεια δίνονται κάποια στοιχεία όσον αφορά την αποτελεσματικότητα της περίσφιξης των υποστυλωμάτων, την συμπεριφορά των μανδύων έναντι λυγισμού των κατακόρυφων ράβδων του δομικού στοιχείου και τους βασικούς τρόπους αστοχίας των FRP μανδύων.*

### **1. ΕΙΣΑΓΩΓΗ**

Μια από τις πιο ραγδαίες τεχνολογικές εξελίξεις των τελευταίων δύο δεκαετιών στο κλάδο των κατασκευών είναι η χρήση των σύνθετων υλικών. Οι επεμβάσεις ενίσχυσης των κατασκευών με τα υλικά αυτά αποτελούν σήμερα μια αποτελεσματική μέθοδο που προστέθηκε στην φαρέτρα του μηχανικού για την αντιμετώπιση πάσης φύσεως κατασκευαστικών ατελειών και βλαβών στις αρχές του 1990.

Η χρήση των σύνθετων υλικών για την ενίσχυση κατασκευών μπορεί να θεωρηθεί ως η φυσική εξέλιξη των ενισχύσεων με μεταλλικά ελάσματα. Ενώ παλιότερα χρησιμοποιούσαν ίνες χάλυβα, σήμερα χρησιμοποιούν ίνες πολυμερών. Οι επεμβάσεις ενίσχυσης με σύνθετα υλικά αποτελούν σήμερα δοκιμασμένες εναλλακτικές λύσεις των παραδοσιακών μεθόδων έγχυτου σκυροδέματος, εκτοξευμένου σκυροδέματος, μεταλλικών ελασμάτων και μεταλλικών κλωβών.

Τα σύνθετα υλικά αρχικά εφαρμόστηκαν για την ενίσχυση γεφυρών στις Η.Π.Α. και ακολούθως για την ενίσχυση κτιριακών κατασκευών. Σήμερα τα σύνθετα υλικά έχουν εκτενώς εφαρμοστεί στις ενισχύσεις πάσης φύσεως τεχνικών έργων τόσο σε κράτη της Αμερικής και της Ασίας όσο και της Ευρώπης συμπεριλαμβανομένης και της χώρας μας.

### **2. ΣΥΣΤΑΤΙΚΑ ΤΩΝ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ**

Τα βασικά συστατικά από τα οποία αποτελούνται τα σύνθετα υλικά και γενικά το σύστημα ενίσχυσης είναι οι ίνες, η μήτρα με την οποία περιβάλλονται οι ίνες και τέλος η κόλλα που χρησιμοποιείται για την ένωση των σύνθετων υλικών με την επιφάνεια του σκυροδέματος του υφιστάμενου δομικού στοιχείου προς ενίσχυση:

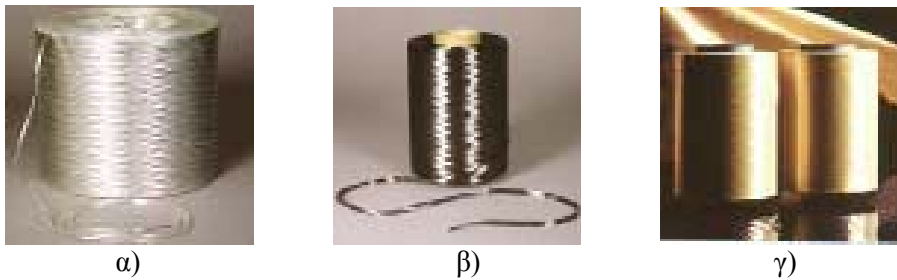
1) Οι ίνες που χρησιμοποιούνται στα σύνθετα υλικά είναι τριών ειδών. Διαθέτουν πολύ υψηλή εφελκυστική αντοχή, έχουν γραμμικά ελαστική συμπεριφορά μέχρι τη θραύση τους (δηλαδή καθόλου πλαστιμότητα) και αποτελούν το φορέα ανάληψης των δυνάμεων.

Ο πιο σημαντικός τύπος ινών που είναι και αυτός που χρησιμοποιείται συνήθως στην αγορά είναι οι ίνες γυαλιού λόγω της χαμηλής τιμής τους σε σχέση με τα άλλα είδη ινών, την ευκολία παραγωγής τους και επίσης εξαιτίας της υψηλής αντοχής τους και δυσκαμψίας τους. Διακρίνονται τρεις τύποι ινών γυαλιού: α) τύπου E που είναι ο κοινός τύπος γυαλιού β) τύπου Z (AR) γ) τύπου S. Παρασκευάζονται από λιωμένο γυαλί, διαθέτουν υψηλή μονωτική ικανότητα, αλλά το κύριο μειονέκτημά τους είναι η μείωση της αντοχής τους σε αλκαλικό περιβάλλον όπως είναι αυτό του σκυροδέματος.

Ο δεύτερος τύπος ινών είναι οι ίνες άνθρακα που χαρακτηρίζονται από μεγαλύτερη αντοχή και μέτρο ελαστικότητας σε σχέση με τις ίνες γυαλιού. Διακρίνονται σε τέσσερις

κατηγορίες: α) υψηλής αντοχής HS, β) μέσου μέτρου ελαστικότητας IM, γ) υψηλού μέτρου ελαστικότητας H, δ) πολύ υψηλού μέτρου ελαστικότητας UHM. Συνήθως παρασκευάζονται από τη θερμική κατεργασία πολυακρυλονιτριλίου. Οι ίνες άνθρακα έχουν την υψηλότερη δυσκαμψία σε σχέση με τους δύο άλλους τύπους ινών και επίσης εκτός από την υψηλή αντοχή τους σε εφελκυσμό (όπως και σε θλίψη) παρουσιάζουν υψηλή αντοχή όσον αφορά τη διάβρωση.

Τέλος, ο τρίτος τύπος ινών είναι οι ίνες αραμιδίου, οι οποίες διακρίνονται σε αυτές που προέρχονται από αρωματικό πολυαμίδιο και σε αυτές που προέρχονται από αρωματικό πολυαιθεραμίδιο. Έχουν γενικά υψηλή εφελκυστική αντοχή, χαμηλό βάρος και υψηλό μέτρο ελαστικότητας. Επίσης παρουσιάζουν πολύ καλή συμπεριφορά σε κρουστικά φορτία. Οι πιο σημαντικές ίνες αραμιδίου είναι οι ίνες Kevlar που διακρίνονται σε Kevlar 29 (χαμηλό μέτρο ελαστικότητας) και σε Kevlar 49 (υψηλό μέτρο ελαστικότητας).



Σχήμα 1. α) ίνες γυαλιού , β) ίνες άνθρακα , γ) ίνες αραμιδίου [11]



Σχήμα 2. Ρολό Σύνθετου υλικού [8]

2) Η μήτρα είναι ένα είδος στερεού υλικού που περιβάλλει τις ίνες, τις συγκολλεί μεταξύ τους, τις κρατάει σταθερές και γενικά τις προστατεύει. Επιπλέον με τη βοήθεια της μήτρας μεταφέρονται στις ίνες οι δυνάμεις που είναι παράλληλες στη διεύθυνση τους, δηλαδή αυτές τις οποίες μπορούν να παραλάβουν. Ο κυριότερος τύπος μήτρας που χρησιμοποιείται γενικά είναι οι εποξειδικές ρητίνες οι οποίες υπερέχουν σε σχέση με άλλους τύπους μητρών παρά το πολύ πιο υψηλό τους κόστος, εξαιτίας της ανθεκτικότητας τους σε σχέση με τις περιβαλλοντικές συνθήκες και των εξαιρετικών μηχανικών τους χαρακτηριστικών. Έτσι καθορίζονται μερικές πολύ σημαντικές μηχανικές ιδιότητες των σύνθετων υλικών όπως η διατμητική και θλιπτική αντοχή τους και γενικά η αντοχή σε δυνάμεις κάθετες στη διεύθυνση των ινών, τις οποίες μόνες τους οι ίνες δεν μπορούν να παραλάβουν.

3) Τρίτο αλλά επίσης αρκετά σημαντικό για την αποτελεσματικότητα του σύνθετου υλικού είναι το είδος της κόλλας που χρησιμοποιείται για την συνένωση των σύνθετων υλικών με την επιφάνεια του υφιστάμενου δομικού στοιχείου προς ενίσχυση. Το συγκολλητικό υλικό που τοποθετείται στη επιφάνεια του σκυροδέματος (αφού γίνει πρώτα η κατάλληλη επεξεργασία της επιφάνειας) είναι ο εποξειδικός στόκος. Πάνω από το στόκο

αυτό αφού λειανθεί η επιφάνεια τοποθετείται εποξειδική ρητίνη πάχους 1-2 mm με τέτοιο ιξώδες ώστε να διευκολύνει την τοποθέτηση του σύνθετου υλικού [2], [3].

### **3. ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΚΑΙ ΜΕΙΟΝΕΚΤΗΜΑΤΑ ΧΡΗΣΗΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΣΤΙΣ ΕΝΙΣΧΥΣΕΙΣ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ**

Η χρήση των σύνθετων υλικών στις ενισχύσεις και επισκευές υφιστάμενων κατασκευών παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με τις «παραδοσιακές» μεθόδους. Μερικά από αυτά είναι τα εξής:

1) Η προετοιμασία της εφαρμογής των σύνθετων υλικών απαιτεί πολύ μικρή προετοιμασία στο χώρο του εργοταξίου. Συνήθως δημιουργεί ελάχιστη όχληση στους χρήστες γιατί κατά κανόνα δεν απαιτεί εκκένωση του προς επισκευή χώρου. Βασικά αυτό συμβαίνει γιατί η εφαρμογή των σύνθετων υλικών γίνεται όπως η τοποθέτηση ταπετσαρίας σε τοίχο. Επιπλέον απαιτείται ελάχιστη προετοιμασία των δομικών στοιχείων που στις περισσότερες περιπτώσεις περιορίζεται στην καθαίρεση των επιχρισμάτων.

2) Το πάχος του σύνθετου υλικού είναι πολύ μικρό, δηλαδή της τάξεως του 1.0 με 2.0 χιλιοστά πάχος ανά στρώση. Έτσι οι διαστάσεις του δομικού στοιχείου που ενισχύεται παραμένουν ουσιαστικά αμετάβλητες σε αντίθεση με τη χρήση άλλων τρόπων ενίσχυσης όπως η χρήση μανδύων οπλισμένου σκυροδέματος όπου οι διαστάσεις των στοιχείων αυξάνονται αισθητά. Με αποτέλεσμα η χρήση των σύνθετων υλικών να γίνεται πολύ πιο ανταγωνιστική όταν υπάρχει περιορισμός του χώρου, γεγονός που παρατηρείται πολύ συχνά.

3) Δεν απαιτείται βαρύς ή ειδικός εξοπλισμός για την τοποθέτηση των σύνθετων υλικών επειδή έχουν μικρό βάρος.

4) Τα σύνθετα υλικά διατίθενται σε πολύ μεγάλα μήκη.

5) Ένα επιπλέον πλεονέκτημα που δεν αφορά την ενίσχυση της κατασκευής αλλά την αισθητική του έργου (γεγονός πολύ σημαντικό ιδίως όταν το έργο είναι ιστορικής αξίας) είναι το ότι τα σύνθετα υλικά μετά την τοποθέτηση τους μπορούν να επιχριστούν και να χρωματιστούν ανάλογα με τις απαιτήσεις του χώρου.

6) Τέλος, το κόστος εφαρμογής των σύνθετων υλικών είναι εφάμιλλο των «παραδοσιακών» μεθόδων. Επιπλέον αν κανείς σκεφτεί την προετοιμασία του εργοταξίου και των επιφανειών των προς ενίσχυση δομικών στοιχείων που απαιτείται για την εφαρμογή άλλων μεθόδων όπως και τον κόπο των εργατών, η χρήση των σύνθετων υλικών φαντάζει ακόμα πιο ιδανική.

Έτσι λαμβάνοντας υπόψη τα παραπάνω μπορούμε να πούμε ότι η χρήση των σύνθετων υλικών είναι μια πολλά υποσχόμενη μέθοδος ενίσχυσης, που με την γοργή ανάπτυξη της τεχνολογίας και την παροχή όλο και πιο βελτιωμένων μεθόδων και υλικών θα γίνει ακόμα πιο αποτελεσματική και ανταγωνιστική στο μέλλον.

Όμως παρά τα τόσα πλεονεκτήματα της χρήσης τους, παρουσιάζουν και ορισμένα μειονεκτήματα :

1) Το υψηλό τους κόστος είναι το σημαντικότερο μειονέκτημα τους, όμως εξαιτίας της μεγάλης ζήτησης των σύνθετων υλικών και της ανάπτυξης της τεχνολογίας είναι ένα μειονέκτημα που τείνει να εξαλειφθεί.

2) Η αντοχή τους σε όσον αφορά υψηλές θερμοκρασίες είναι αρκετά μικρή.

3) Αν και έχουν μεγάλη παραμορφωσιμότητα υπάρχει σημαντική έλλειψη πλαστιμότητας, όμως δεν είναι ο λόγος χρήσης τους η αύξηση της πλαστιμότητας και έτσι και αλλιώς το υφιστάμενο δομικό στοιχείο διαθέτει ακόμα κάποια ικανότητα πλαστιμότητας.

4) Γενικά λόγω του ότι η χρήση των σύνθετων υλικών είναι σχετικά νέα πολλές φορές οι τεχνίτες δεν έχουν την απαραίτητη εμπειρία και γνώσεις για την χρήση τους [1], [2], [3].

#### 4. ΤΡΟΠΟΣ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΤΩΝ ΜΑΝΔΥΩΝ ΑΠΟ ΣΥΝΘΕΤΑ ΥΛΙΚΑ ΣΕ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΑ

Γενικά η εφαρμογή των σύνθετων υλικών είναι αρκετά εύκολη και δεν απαιτεί ιδιαίτερη προετοιμασία εφαρμογής όπως η εφαρμογή άλλων παραδοσιακών μεθόδων. Παρακάτω παρουσιάζεται εν συντομία ο τρόπος και η διαδικασία εφαρμογής των μανδύων από σύνθετα υλικά.

Αρχικά μπορούμε να διακρίνουμε δύο βασικούς τρόπους προετοιμασίας της επιφάνειας σκυροδέματος:

Ο πρώτος είναι ο επιμελής καθαρισμός της επιφάνειας σκυροδέματος από χαλαρά τμήματα, σοβάδες, χρώματα, λίπη κλπ. Στη συνέχεια ακολουθεί τρίψιμο της επιφάνειας με κάποιο είδος σκληρής βούρτσας. Στόχος είναι η επίτευξη λείας επιφάνειας. Αν τυχόν χρειαστούν επιδιορθώσεις στην επιπεδότητα της επιφάνειας γίνονται με τη βοήθεια είτε ινοπλισμένου τσιμεντοκονιάματος είτε κάποιας εποξειδικής πάστας.

Ο δεύτερος τρόπος απαιτεί λίγο πιο εκτεταμένη διεργασία της επιφάνειας, ξεκινώντας με απομάκρυνση της επιδερμικής στρώσης σκυροδέματος στην επιφάνεια, όπου πρόκειται να τοποθετηθεί το σύνθετο υλικό, μέχρι να αποκαλυφθούν τα αδρανή (δηλαδή μέχρι βάθος περίπου 5mm). Η διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται με τη χρήση κάποιου ειδικού μηχανικού εξοπλισμού ή με υδροβολή. Στη συνέχεια αφού καθαριστεί πολύ καλά η επιφάνεια σκυροδέματος, γίνεται διαβροχή με νερό υπό πίεση και μετά στεγνώνεται πολύ καλά έτσι ώστε η υγρασία της επιφάνειας να είναι αρκετά μικρή (δηλαδή της τάξεως του 4%). Επιπλέον η θερμοκρασία της επιφάνειας του σκυροδέματος κατά την ενίσχυση με σύνθετα υλικά δεν πρέπει να είναι μικρότερη από +5 °C. Έπειτα εμποτίζεται με αραιό διάλυμα εποξειδικής ρητίνης, στην περίπτωση που κριθεί ιδιαίτερα πορώδης ή υπάρχουν μικρορηγματώσεις της επιφάνειας σκυροδέματος. Τέλος τοποθετείται εποξειδικός στόκος, ο οποίος είναι ένα είδος παχύρευστου συγκολλητικού υλικού. Αφού σκληρυνθεί το συγκεκριμένο υλικό γίνεται λείανση ώστε να υπάρχουν τυχόν ανωμαλίες μεγαλύτερες από 1 mm.

Στην περίπτωση που το υφιστάμενο προς ενίσχυση υποστυλώμα είναι ορθογωνικής μορφής απαιτείται εξομάλυνση και λείανση των γωνιών ώστε να αποκτήσουν καμπυλότητα με ακτίνα 30 mm.

Επόμενο βήμα είναι η επάλειψη της επιφάνειας αναμονής με εποξειδική ρητίνη πάχους 1 με 2 mm κατάλληλου ιξώδους ώστε να διευκολυνθεί η τοποθέτηση του σύνθετου φύλλου. Γενικά τοποθετείται μεγαλύτερη ποσότητα κόλλας στον άξονα του υφάσματος (δηλαδή στο κέντρο του) και όχι στις άκρες με σκοπό την υπερχειλίση της κόλλας από το κέντρο προς τις άκρες. Αφού απομακρυνθεί η ενσωματωμένη ταινία που υπάρχει στην πλευρά προς συγκόλληση του ρολού, το ύφασμα τοποθετείται και πιέζεται σταθερά με πλαστικό ρολό (έτσι θα υπερχειλίσει η κόλλα από τις άκρες) ώστε να μην μείνει εγκλωβισμένος αέρας μεταξύ της κόλλας και του σκυροδέματος. Το συνολικό πάχος της κόλλας μετά την πίεση με το πλαστικό ρολό πρέπει να είναι 0,5 με 2 mm.

Μετά την τοποθέτηση του σύνθετου υφάσματος στην επιφάνεια εφαρμογής γίνεται έλεγχος εντοπισμού τυχόν εγκλωβισμένου αέρα, με ελαφριά χτυπήματα πάνω στο έλασμα (ηχητικός έλεγχος), έτσι ώστε να είμαστε σίγουροι για την αποτελεσματικότητα του σύνθετου υλικού που εξαρτάται από την καλή ή κακή συνένωση του με το σκυροδέμα.

Αφού περάσει χρονικό διάστημα της τάξεως της μισής με μίας ώρας, γίνεται αφαίρεση του προστατευτικού καλύμματος της εξωτερικής επιφάνειας του φύλλου και γίνεται επάλειψη του υφάσματος με μια δεύτερη στρώση της ίδιας ρητίνης.

Αν υπάρχει ενδεχόμενο τοποθέτησης περισσότερων του ενός φύλλων σύνθετου υλικού τότε επαναλαμβάνεται η διαδικασία ώστε να γίνει η συνένωση των δύο σύνθετων υφασμάτων.

Μετά την ολοκλήρωση της τοποθέτησης συνήθως χρησιμοποιούνται ειδικά επιχρίσματα (ή ακόμα αν το επιτρέπει το σχήμα του υποστρώματος τοποθέτηση γυψοσανίδας) με σκοπό την αύξηση της ανθεκτικότητας του σύνθετου υλικού σε υψηλές θερμοκρασίες (για παράδειγμα σε περίπτωση πυρκαγιάς) και της ανθεκτικότητας τους στο χρόνο [1], [7].



α)



β)

Σχήμα 3. Τοποθέτηση μανδυνών από σύνθετα υλικά σε υποστρώματα [8]



Σχήμα 4. Προετοιμασία εφαρμογής τοποθέτησης μανδυνών σύνθετων υλικών σε υποστύλωμα [10]



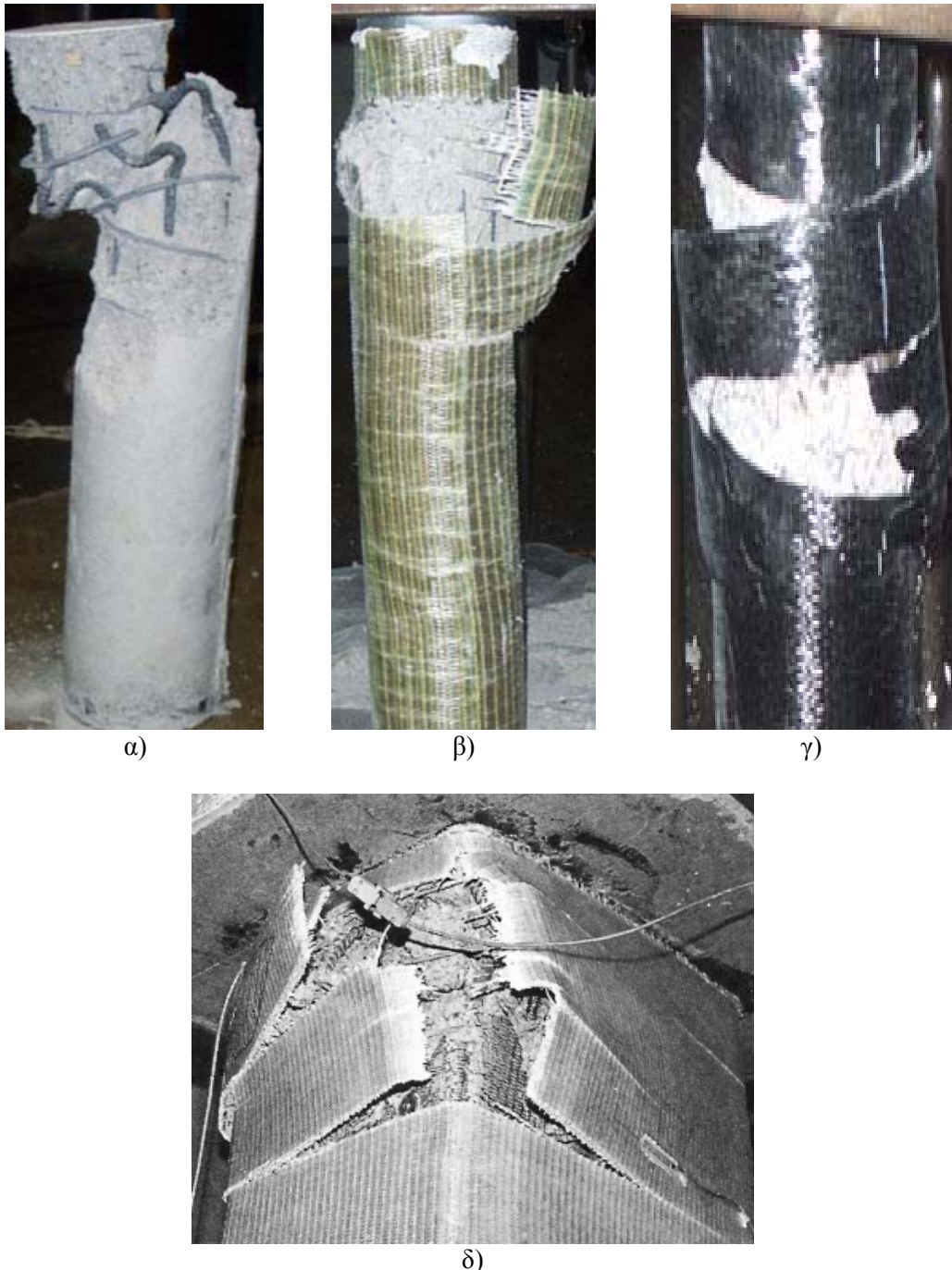
Σχήμα 5. α) Τοποθέτηση υφάσματος σύνθετου υλικού , β) Πλαστικό ρολό για σωστή συνένωση επιφάνειας-σύνθετου υλικού [9]

## 5. ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΙΚΟΤΗΤΑ ΠΕΡΙΣΦΙΞΗΣ ΥΠΟΣΤΥΛΩΜΑΤΩΝ ΜΕ ΜΑΝΔΥΕΣ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Η χρήση μανδύων από σύνθετα υλικά για την περίσφιξη υποστυλωμάτων είναι πολύ πιο αποτελεσματική σε σχέση με τη χρήση μεταλλικών μανδύων ή κάποιας άλλης μεθόδου. Γενικά η αξονική καταπόνηση των υποστυλωμάτων έχει ως συνέπεια την εγκάρσια διόγκωση του σκυροδέματος, με αποτέλεσμα την ενεργοποίηση του μανδύα σύνθετων υλικών που το περιβάλλει μέσω ανάπτυξης εφελκυστικών παραμορφώσεων στις ίνες. Έτσι επιβάλλονται στο σκυρόδεμα εγκάρσιες θλιπτικές τάσεις κάθετα στον άξονα του μέλους από το μανδύα μέχρις ότου επέλθει η αστοχία του. Οι εγκάρσιες αυτές τάσεις περίσφιξης έχουν ως αποτέλεσμα τα ακόλουθα:

- 1) Αυξάνεται η θλιπτική αντοχή και τη μέγιστη κρίσιμη παραμόρφωση σε τιμές πολύ μεγαλύτερες από το συμβατικό όριο αστοχίας.
- 2) Αυξάνεται η πλαστιμότητα του σκυροδέματος με δεδομένη μάλιστα την επιρροή της σεισμικής φόρτισης σε μια κατασκευή, είναι πολύ σημαντικό να εξασφαλίζεται η πλάστιμη συμπεριφορά ενός φορέα σε όσον το δυνατό μεγαλύτερες παραμορφώσεις.
- 3) Βελτιώνονται οι συνθήκες συνάφειας μεταξύ των ράβδων οπλισμού και του σκυροδέματος σε περιοχές με ματίσεις και εν συνεχεία παρεμποδίζεται η ολίσθηση των διαμήκων ράβδων στις περιοχές αυτές με συνέπεια πιο πλάστιμη συμπεριφορά σε φορείς με ανεπαρκή μήκη ματίσεως.
- 4) Τέλος, στις περιοχές που υπάρχει αραιή διάταξη συνδετήρων, καθυστερείται η εμφάνιση λυγισμού των διαμήκων ράβδων του δομικού στοιχείου.

Αξίζει να προσθέσουμε ότι η γεωμετρία των υποστυλωμάτων παίζει σημαντικό ρόλο στην αποτελεσματικότητα των σύνθετων υλικών. Γενικά είναι κοινώς αποδεκτό ότι η περίσφιξη του σκυροδέματος με σύνθετα υλικά είναι πιο αποτελεσματική σε κυκλικές διατομές. Αυτό συμβαίνει εξαιτίας του σχήματος των κυκλικών μανδύων, οι οποίοι όταν βρίσκονται σε εφελκυσμό δημιουργούν συνεχείς τάσεις προς την περιφέρεια. Αντιθέτως, σε υποστυλώματα ορθογωνικών διατομών υπάρχει συγκέντρωση τάσεων στις γωνίες. Έτσι καθώς το σκυρόδεμα διογκώνεται, η πίεση περίσφιξης είναι πολύ σημαντική στις γωνίες [2].



Σχήμα 6. α)Αστοχία υποστυλώματος χωρίς μανδύα ,β)Αστοχία μανδύα από ίνες γυαλιού GFRP ,  
γ)Αστοχία μανδύα από ίνες άνθρακα CFRP, δ)Αστοχία μανδύα σε υποστύλωμα ορθογωνικής  
διατομής [6] , [9]

## 6. ΣΥΜΠΕΡΙΦΟΡΑ ΜΑΝΔΥΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ ΕΝΑΝΤΙ ΤΟΥ ΛΥΓΙΣΜΟΥ ΤΩΝ ΔΙΑΜΗΚΩΝ ΡΑΒΔΩΝ ΚΑΤΑΚΟΡΥΦΟΥ ΔΟΜΙΚΟΥ ΣΤΟΙΧΕΙΟΥ

Σήμερα πλέον γνωρίζουμε ότι σε πολλές υφιστάμενες κατασκευές εντοπίζεται ανεπάρκεια των πρακτικών όπλισης λόγω αραιής διάταξης συνδετήρων και ανεπαρκούς αγκύρωσης τους. Αυτό συμβαίνει λόγω της διαφορετικής φιλοσοφίας σχεδιασμού των κατασκευών της εποχής (μιλώντας για πριν το 1980) που βασιζόνταν αποκλειστικά σε κριτήρια αντοχής χωρίς ικανοτικούς ελέγχους. Σήμερα όμως γνωρίζουμε ότι τα στοιχεία αυτά υπόκεινται σε πρόσθετες επιβαρύνσεις λόγω ανεπαρκούς περίσφιξης, που συνοψίζονται σε ταχύτατη αποσύνθεση της καμπτοδιατμητικής αντοχής του δομικού στοιχείου σε ανακυκλιζόμενη

φόρτιση και απώλεια φέρουσας ικανότητας έναντι κατακόρυφων φορτίων λόγω πρώιμου λυγισμού των διαμήκων ράβδων.

Όπως αναφέραμε και παραπάνω με την εφαρμογή μανδύων από σύνθετα υλικά επιδιώκεται η βελτίωση της αντοχής και της παραμορφωσιμότητας του εγκιβωτισμένου σκυροδέματος, διότι έτσι καθυστερείται η πλευρική διόγκωση που τελικά σηματοδοτεί και την αστοχία του. Όμως η αραιή διάταξη συνδετήρων σημαίνει εμφάνιση πρόωρου λυγισμού με άμεση συνέπεια την εκτίναξη της επικάλυψης και την τοπική θραύση του μανδύα ανεξαρτήτως του αριθμού στρώσεων του σύνθετου υλικού που θα χρησιμοποιηθεί. Από τις έρευνες που έχουν γίνει μέχρι τώρα, στην περίπτωση οπλισμένου σκυροδέματος με αραιά τοποθετημένους συνδετήρες υπό κεντρική θλίψη δεν τεκμηριώνεται η βελτίωση της συμπεριφοράς του σκυροδέματος από τη συμβολή του μανδύα (όπως παρατηρείται με την τοποθέτηση πυκνών συνδετήρων ή σπειροειδή οπλισμού), αυτό λόγω της πρώιμης εξάντλησης της φέρουσας ικανότητας του σύνθετου υλικού από συγκέντρωση τάσεων στα σημεία λυγισμού των ενσωματωμένων διαμήκων οπλισμών.

Επιπλέον μπορούμε να προσθέσουμε ότι σε στοιχεία προσβεβλημένα από διάβρωση, ο εγκάρσιος επικολλημένος μανδύας λειτουργεί ως μηχανισμός περιορισμού έναντι διεύρυνσης των ρωγμών αναπτύσσοντας ισοδύναμη περισφιγκτική τάση αφού η διαδικασία της διάβρωσης αποτελεί ένα διογκωτικής φύσης φαινόμενο. Η αποτελεσματικότητα του μανδύα ως μέσο επιβράδυνσης του ρυθμού διάβρωσης σχετίζεται με την αδιαπερατότητα της χημικά αδρανούς ρητίνης στη σκληρυμένη της κατάσταση που αποστερεί την οξειδωτική διαδικασία από παροχή οξυγόνου και υγρασίας. Αν και οι μανδύες μπορούν να βελτιώσουν σημαντικά την παραμορφωσιμότητα των δομικών στοιχείων (να αποκαταστήσουν την έλλειψη των συνδετήρων), δυστυχώς η φέρουσα ικανότητα του δομικού στοιχείου επηρεάζεται ανεπανόρθωτα από τη μείωση της διατομής του διαμήκους οπλισμού λόγω της διάβρωσης του.

Τώρα, για να εξερευνήσουμε τη σχέση μεταξύ λυγισμού ράβδου και της διάρρηξης του μανδύα, ας λάβουμε ένα υποστύλωμα όπως αυτό του σχήματος 7. Πρόκειται για ένα υποστύλωμα τετραγωνικής διατομής  $200 \times 200 \text{ mm}^2$  που περιέχει τέσσερις γωνιακές ράβδους ακτίνας 12 mm. Ας υποθέσουμε ότι το στοιχείο ράβδου βρίσκεται ανάμεσα σε επιτυχώς τοποθετημένους συνδετήρες, ανά καθορισμένη απόσταση  $s$ . Όπως φαίνεται και στο σχήμα 8, για συμμετρικό λυγισμό της ράβδου έχουμε προς τα έξω κάμψη των διαμήκων ράβδων κατά  $w$ . Έτσι ο μανδύας ο οποίος είναι τυλιγμένος εγκάρσια εντείνεται τοπικά σε παραμόρφωση,  $\epsilon_{fh}$ :

$$\epsilon_{fh} = w / (R_{ch} + 0,5 D_b) \quad (1)$$

,όπου  $w$  είναι το βέλος κάμψης της ράβδου κάθετα στο διαμήκη άξονα της,  $R_{ch}$  η ακτίνα καμπύλωσης των στρογγυλεμένων γωνιών του υποστυλώματος και  $D_b$  η διάμετρος γωνιακής ράβδου

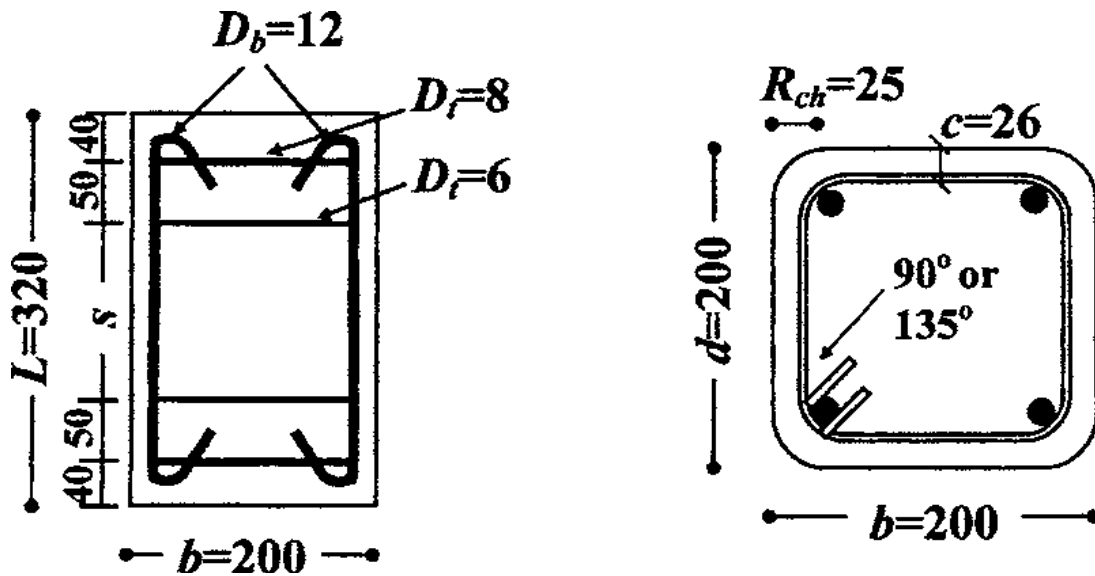
Για  $R_{ch} = 25 \text{ mm}$  και  $D_b = 12 \text{ mm}$ , ο μανδύας θα φτάσει την παραμόρφωση θραύσης του, δηλαδή 1,5% για CFRP και 2,1% για GFRP, όταν η προς τα έξω κάμψη των διαμήκων ράβδων γίνει 0,465 mm και 0,651 mm αντίστοιχα. Σε στάδιο δηλαδή που ουσιαστικά ο λυγισμός είναι ακόμα ανεπαίσθητος.

Στην συνέχεια, υποθέτοντας συμμετρικό λυγισμό και για τις τέσσερις γωνιακές ράβδους του υποστυλώματος, υπολογίζεται η κατά μέσο όρο ονομαστική πλευρική παραμόρφωση :

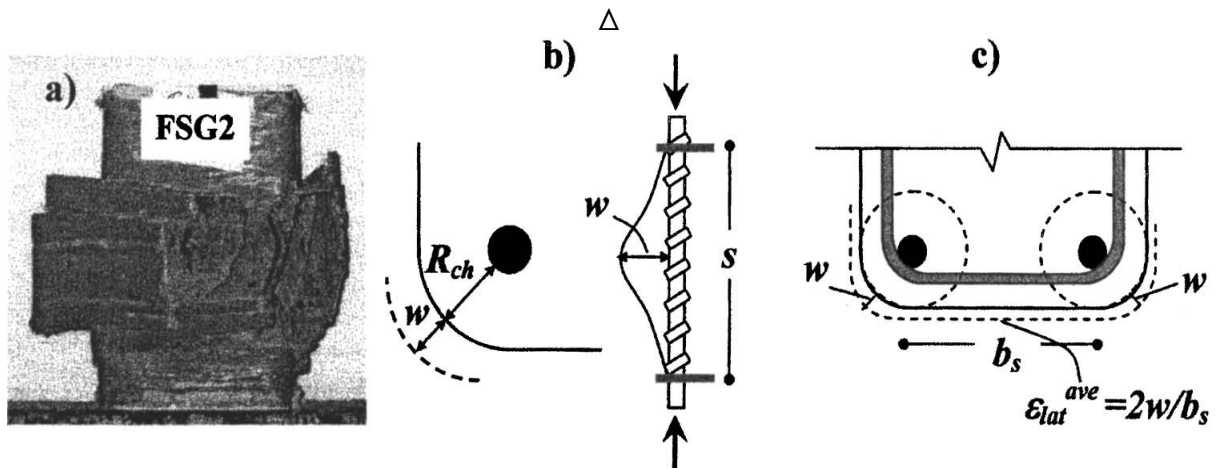
$$\epsilon_{lat}^{ave} = 2w / b_s \quad (2)$$

,όπου  $b_s = b - 2 R_{ch}$  (δηλαδή  $b_s = 200 - 2 \times 25 = 150 \text{ mm}$ ), όπως φαίνεται και στο σχήμα 7, και ισούται με 0,62% και 0,875% για CFRP και GFRP αντίστοιχα. Είναι σημαντικό να τονίσουμε ότι οι παραπάνω τιμές είναι ανεξάρτητες του αριθμού στρωμάτων του μανδύα.





Σχήμα 7. Γεωμετρικά χαρακτηριστικά του υποστρώματος



Σχήμα 8. α) τυπικός τρόπος αστοχίας μανδύα λόγω λυγισμού των ράβδων, β) συμμετρικός λυγισμός ράβδου, γ) ονομαστική πλευρική παραμόρφωση όταν οι ράβδοι λυγίζουν συμμετρικά κατά w [4]

Επιπλέον οι παραπάνω τιμές αποτελούν τα κατώτερα όρια τιμών, αυτό συμβαίνει γιατί στις τιμές αυτές δεν συμπεριλαμβάνονται οι πρόσθετες παραμορφώσεις  $\epsilon_f^{dil}$ , που επιβάλλονται στο μανδύα στα μέσα των πλευρών του δομικού στοιχείου λόγω της διόγκωσης του εγκιβωτισμένου πυρήνα σκυροδέματος. Ουσιαστικά, αυτές οι επιπλέον παραμορφώσεις προκαλούν αύξηση των μέσων τιμών κατά 10-20%. Έτσι, μετά το λυγισμό των ράβδων, οι εγκάρσιες καταπονήσεις ποικίλουν γύρω στην περίμετρο του τετραγωνικού στοιχείου. Στις γωνίες, η παραμόρφωση φτάνει τη μέγιστη ονομαστική τιμή της και έτσι αυτές είναι οι θέσεις όπου γίνεται διάρρηξη του μανδύα. Ενώ σε οποιαδήποτε άλλη θέση της περιμέτρου, η ονομαστική πλευρική παραμόρφωση θα ισούται με :

$$\epsilon_{lat}^{ave} = 2 (\epsilon_{fu} - \epsilon_f^{dil}) (R_{ch} + 0,5 D_b) / b_s + \epsilon_f^{dil} \quad (3)$$

Ένας επίσης ενδιαφέρον τύπος, που αξίζει να παρουσιάσουμε, είναι αυτός που συσχετίζει την προς τα έξω κάμψη των διαμήκων ράβδων με τη βράχυνση του εγκιβωτισμένου σκυροδέματος :

$$\Delta \epsilon_{cc} = (w^2 \cdot \pi^2 \cdot (1 + 3 w^2 \cdot \pi^2 / 16s^2)) / 4s^2 \quad (4)$$

Επίσης, για τιμές του  $D_b$  και του  $s$ , τέτοιες ώστε ο λόγος  $(s / D_b)$  να είναι περίπου 12, μπορούμε να πούμε ότι θα έχουμε αύξηση της ικανότητας αξονικής καταπόνησης της τάξεως του 0,0025-0,003 για CFRP και 0,005 για GFRP.

Τέλος, αν το δομικό μας στοιχείο είναι κυκλικής διατομής μπορούμε να πούμε ότι η τιμή του  $w$ , που μπορεί να αντέξει ο μανδύας, είναι πολλαπλάσια (περίπου τέσσερις φορές μεγαλύτερη) αυτής που αναφέραμε παραπάνω για δομικά στοιχεία ορθογωνικής διατομής. (Για τον υπολογισμό του  $w$  σε στοιχείο κυκλικής διατομής, αντί για την ακτίνα  $R_{ch}$  μπορούμε να χρησιμοποιήσουμε την ακτίνα της κυκλικής διατομής) [4], [5].

## 6. ΑΣΚΟΥΜΕΝΗ ΠΛΕΥΡΙΚΗ ΠΙΕΣΗ ΑΠΟ ΤΟΝ ΜΑΝΔΥΑ ΣΤΟ ΕΓΚΙΒΩΤΙΣΜΕΝΟ ΣΚΥΡΟΔΕΜΑ

Μια πολύ γνωστή εξίσωση που συσχετίζει την προσαυξημένη θλιπτική αντοχή του περισφιγμένου σκυροδέματος με την αντοχή του απερίσφιγκτου και την παρεχόμενη περισφικτική τάση από το μανδύα, είναι αυτή που γράφτηκε το 1928 από τον Richart :

$$f_{cc} = f_c + \lambda \cdot \sigma_{lat}^{eff} \quad (5)$$

,όπου ο συντελεστής  $\lambda$  ισούται με 4,1.

Στην περίπτωση, όμως, παρεχόμενης περίσφιξης από σύνθετο μανδύα προτείνεται χαμηλότερη τιμή για το συντελεστή  $\lambda$  περίπου ίση με 3. Ως αποτέλεσμα ισορροπίας και στις δύο διευθύνσεις της διατομής ( $x$  και  $y$ ), η ονομαστική πλευρική πίεση ορίζεται ως :

$$\sigma_{lat}^{eff} = 0,5 \cdot (\sigma_{lat-x}^f + \sigma_{lat-y}^f) + 0,5 \cdot (\sigma_{lat-x}^{st} + \sigma_{lat-y}^{st}) =$$

$$= 0,5 \cdot (k_f \cdot \rho_{fv} \cdot E_f \cdot \varepsilon_f^{eff} + k_{st} \cdot \rho_{sv} \cdot f_{yst}) \quad (6)$$

,όπου οι εκθέτες  $f$  και  $st$  αφορούν στη συμβολή του σύνθετου μανδύα και των συνδετήρων,  $\rho_{sv}$  είναι ογκομετρικό ποσοστό συνδετήρων (ως προς τον εγκιβωτισμένο πυρήνα),  $\rho_{fv} = 2 \cdot t_f \cdot (b+d) / (b \cdot d)$  είναι το ογκομετρικό ποσοστό του μανδύα (ως προς το εγκιβωτισμένο δομικό στοιχείο).

Μπορούμε να πούμε ότι το πρώτο τμήμα της εξίσωσης (6) έχει τη μορφή  $S_f \cdot \varepsilon_f^{eff}$ , όπου  $S_f = k_f \cdot t_f \cdot E_f / b$  ορίζεται ως η αξονική δυσκαμψία του μανδύα και εξαρτάται από το σχήμα της διατομής, το πάχος, και το μέτρο ελαστικότητας του μανδύα.

Ειδικότερα, ο συντελεστής  $k_f = 1 - ((b_s^2 + d_s^2) / (3A_g))$  προσεγγίζει το ογκομετρικό κλάσμα του πυρήνα που περισφίγγεται αποτελεσματικά ( $b_s$  και  $d_s$  είναι οι ευθείες πλευρές ορθογωνικής διατομής μετά το στρογγύλευμα των γωνιών και  $A_g$  το εμβαδόν της τετραγωνικής διατομής, δηλαδή  $b \cdot d$ ). Για κυκλική διατομή μετά από πράξεις ισχύει  $k_f = 1$ , ενώ για τετραγωνική διατομή με  $R_{ch} = 25\text{mm}$  απομειώνεται σε  $k_f = 0,625$  (η απομείωση είναι εντονότερη όσο ο λόγος των πλευρών αυξάνεται).

Αυτό που είναι σίγουρο είναι η συστηματική βελτίωση της αντοχής με την δυσκαμψία του μανδύα. Επίσης, όπως έχουμε αναφέρει και προηγουμένως, υπάρχει σημαντική μείωση της αποτελεσματικότητας περίσφιξης μανδύα FRP, από κυκλική σε ορθογωνική διατομή, αλλά και μείωση της διαθέσιμης παραμορφωσιμότητας λόγω τοπικής θραύσης του μανδύα στις γωνίες των ορθογωνικών στοιχείων [5].

## 7. ΤΡΟΠΟΙ ΑΣΤΟΧΙΑΣ ΜΑΝΔΥΑ ΣΥΝΘΕΤΩΝ ΥΛΙΚΩΝ

Γενικά, υπάρχουν ποικίλοι τρόποι αστοχίας του μανδύα, αλλά οι πιο συνηθισμένοι είναι οι παρακάτω τρεις :

1) Έλλειψη συνάφειας στο υπόστρωμα που δημιουργείται από το κλείσιμο του μανδύα.

Η παραμόρφωση αστοχίας εξαιτίας της ελλειπούς συνάφειας στο μήκος αγκύρωσης του μανδύα,  $L_f$ , όπως φαίνεται και στο σχήμα 9. συμβολίζεται ως  $\varepsilon_f^{deb}$  και υπολογίζεται από την παρακάτω σχέση:

$$\varepsilon_f^{deb} = ((f_{a,u} \cdot s_{a,u}) / (E_f \cdot t_f))^{0,5} \quad (7)$$

,όπου  $E_f$  = μέτρο ελαστικότητας μανδύα,

$t_f$  = πάχος μανδύα,

$f_{a,u}$  = διατμητική αντοχή συγκόλλησης,

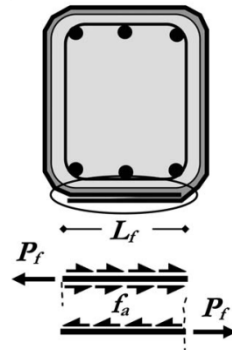
$s_{a,u}$  = όριο  $s_{a,u}$  ολίσθησης της κόλλας

Το απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης για την αποφυγή της αστοχίας του μανδύα δίνεται από τη σχέση:

$$L_f = ((s_{a,u} \cdot E_f \cdot t_f) / f_{a,u})^{0,5} \quad (8)$$

Για παράδειγμα, για ένα μανδύα από ίνες άνθρακα όπου έχει πάχος  $t_f = 0,13 \text{ mm}$  και μέτρο ελαστικότητας  $E_f = 235 \text{ GPa}$  και υποθέτοντας  $f_{a,u} = 5 \text{ MPa}$  και  $s_{a,u} = 1 \text{ mm}$ , προκύπτει  $\epsilon_f^{\text{deb}} = 1,28\%$ , μία τιμή αρκετά κοντά στο όριο αστοχίας, που για CFRP είναι  $\epsilon_{fu} = 1,50\%$ . Επίσης με τις ίδιες τιμές προκύπτει απαιτούμενο μήκος αγκύρωσης  $L_f = 78 \text{ mm}$ .

Αξίζει να σημειώσουμε ότι οι τιμές για το  $f_{a,u}$  είναι υψηλότερες για τα εσωτερικά στρώματα του μανδύα, επειδή η διατμητική αντοχή της συγκόλλησης στα εσωτερικά στρώματα βελτιώνεται με την τριβή εξαιτίας της περίσφιξης. Έτσι, η αντοχή του μανδύα αυξάνεται με αύξηση του αριθμού των στρωμάτων του.



Σχήμα 9. Μήκος αγκύρωσης του μανδύα και δυνάμεις που ασκούνται σε αυτό [4]

2) Διάρρηξη του μανδύα εξαιτίας της εκτεταμένης διόγκωσης του περισφιγμένου σκυροδέματος.

Η εγκάρσια καταπόνηση λόγω διόγκωσης του εγκιβωτισμένου πυρήνα σκυροδέματος συμβολίζεται ως  $\epsilon_f^{\text{dil}}$  και ισούται με :

$$\epsilon_f^{\text{dil}} = \nu \cdot \epsilon_{cc,u}$$

,όπου  $\nu$  = ο λόγος Poisson κοντά ή στην αστοχία του περισφιγμένου σκυροδέματος

Ένας τρόπος υπολογισμού της  $\epsilon_{cc,u}$  είναι αυτός που προτάθηκε από τον Priestley και τους συνεργάτες του το 1996 :

$$\begin{aligned} \epsilon_{cc,u} &= 0,004 + 1,4(\epsilon_{su} \cdot \rho_{sv} \cdot f_{yst}) / f_{cc} = \\ &= 0,004 + 1,25(k_f^{\text{conf}} \cdot \rho_{fv} \cdot E_f \cdot (\epsilon_f^{\text{eff}})^2 + k_{st} \cdot \epsilon_{su} \cdot \rho_{sv} \cdot f_{yst}) / f_{cc} \quad (9) \end{aligned}$$

,όπου οι δείκτες  $f$  και  $st$  αναφέρονται στο μανδύα και στους συνδετήρες αντίστοιχα,  $\rho_{sv}$  = ογκομετρικό ποσοστό συνδετήρων (ως προς τον εγκιβωτισμένο πυρήνα),  $\rho_{fv} = 2 \cdot t_f \cdot (b+d) / (b \cdot d)$  είναι το ογκομετρικό ποσοστό του μανδύα (ως προς το εγκιβωτισμένο δομικό στοιχείο),  $k_f$  ο συντελεστής γεωμετρικής αποτελεσματικότητας και  $\epsilon_{su}$  η παραμόρφωση αντοχής των συνδετήρων.

3) Τοπική διάρρηξη του μανδύα εξαιτίας του λυγισμού των ράβδων οπλισμού του δομικού στοιχείου.

Έχοντας ήδη αναφερθεί εκτενώς στην παραμόρφωση του μανδύα λόγω λυγισμού των ράβδων, θα παρουσιάσουμε εν συντομία κάποια επιπλέον στοιχεία. Όπως είναι γνωστό ο λυγισμός των διαμήκων ράβδων που είναι τοποθετημένες ανάμεσα σε αραιούς συνδετήρες προκαλεί διάρρηξη του μανδύα. Έτσι, μία σχέση υπολογισμού της κατά μέσο όρο εγκάρσιας παραμόρφωσης του μανδύα  $\epsilon_f^{\text{buckl}}$  σε σχέση με την αξονική παραμόρφωση της ράβδου λόγω λυγισμού της,  $\epsilon_{f,\text{scrit}}$ , είναι :

$$\epsilon_f^{\text{buckl}} = \nu_u \cdot \epsilon_{f,\text{scrit}} \quad (10)$$

,όπου  $\nu_u$  ο λόγος Poisson που θεωρείται ίσος με 0,5 για κυκλικής διατομής δομικά στοιχεία και 1,0 για τετραγωνικής διατομής δομικά στοιχεία [4].

Τέλος, ως ονομαστική τιμή της παραμόρφωσης του μανδύα θα θεωρείται η μικρότερη τιμή ανάμεσα στις τρεις παραπάνω αναφερθείσες τιμές, δηλαδή :

$$\varepsilon_f^{\text{eff}} = \min \{ \varepsilon_f^{\text{deb}}, \varepsilon_f^{\text{dil}}, \varepsilon_f^{\text{buckl}} \} \quad (11)$$

## 8. ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στη σημερινή εποχή, τα σύνθετα υλικά αποτελούν έναν από τους πλέον εφαρμόσιμους και πιο αποτελεσματικούς τρόπους ενίσχυσης των κατασκευών. Αυτό είναι φανερό, αν κανείς λάβει υπ' όψιν του τα πλεονεκτήματα που απορρέουν από τη χρήση τους.

Μέσα από την παραπάνω εργασία, μπορούμε να συμπεράνουμε ότι οι μανδύες σύνθετων υλικών βοηθούν στην αύξηση της θλιπτικής αντοχής του σκυροδέματος, ενώ παράλληλα καθυστερούν την εμφάνιση φαινομένων όπως ο λυγισμός των ράβδων σε περιοχές όπου υπάρχει αραιή διάταξη συνδετήρων.

Επίσης, η χρήση των FRP μανδύων είναι πολύ πιο αποτελεσματική σε υποστυλώματα κυκλικής διατομής σε σχέση με αυτά που έχουν ορθογωνική διατομή. Ακόμη μπορούμε να προσθέσουμε ότι η αποτελεσματικότητα της περίσφιξης εξαρτάται από το είδος του σύνθετου υλικού και προκύπτει ότι οι CFRP μανδύες είναι καταλληλότεροι συγκριτικά με τους GFRP.

Εν κατακλείδι, παρά τα όσα πλεονεκτήματα που προσφέρουν οι μανδύες των σύνθετων υλικών, ακόμα και αν υποθέσουμε άριστη τοποθέτησή τους, υπάρχει πάντα ο κίνδυνος αστοχίας τους, είτε λόγω διόγκωσης του περισιγμένου σκυροδέματος, είτε λόγω λυγισμού των διαμήκων ράβδων, που τελικά θα περιορίσει τη θεαματική βελτίωση της συμπεριφοράς του δομικού στοιχείου.

## 9. ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

- [1] **Ενισχύσεις / Επισκευές Κατασκευών Από Οπλισμένο Σκυρόδεμα** Σ.Η. Δρίτσος, Πάτρα 2007
- [2] **Ενισχύσεις Κατασκευών Οπλισμένου Σκυροδέματος Και Φέρουσας Τοιχοποιίας Με Σύνθετα Υλικά** Αθανάσιος Χ. Τριανταφύλλου, Πάτρα 2006
- [3] **Ενίσχυση Στοιχείων Οπλισμένου Σκυροδέματος Μέσω Περίσφιξης Με Σύνθετα Υλικά Ανόργανης Μήτρας**, Διατριβή μεταπτυχιακού διπλώματος ειδίκευσης, Παναγιώτα Βασιλίου, Πάτρα, Ιούλιος 2006
- [4] **Limitation Of FRP Jacketing In Confining Old-Type Reinforced Concrete Members In Axial Compression** S.P. Tastani, S.J. Pantazopoulou, M.ASCE, D. Zdoumba, V. Plakantaras and E. Akritidis, Journal Of Composites For Construction © ASCE / January / February 2006
- [5] **Πειραματική Διερεύνηση Παλαιού Τύπου Θλιβόμενων Στοιχείων Ο.Σ. Με Πρότερη Βλάβη: Ενίσχυση / Επισκευή Με Μανδύες Σύνθετων Υλικών** Σουζάνα Π. Ταστάνη, Σταυρούλα Ι. Πανταζοπούλου, Επιστημονική Έκδοση - Κτίριο
- [6] **Retrofit Of Circular Reinforced Concrete Columns Using FRP, Steel And Concrete Jackets**, Halil Sezen, Ohio State University, 470 Hitchcock Hall, Columbus, OH [sezen.1@osu.edu](mailto:sezen.1@osu.edu) Eric Miller, Michael Baker Jr. Columbus, Ohio, 2007 Structures Congress: New Horizons And Better Practices © 2007 ASCE
- [7] [http://www.isomat.gr/component/page.shop.product\\_details/category\\_id.50/flypage.shop.flypage14/product\\_id.81/option.com\\_virtuemart/Itemid.68/lang.el](http://www.isomat.gr/component/page.shop.product_details/category_id.50/flypage.shop.flypage14/product_id.81/option.com_virtuemart/Itemid.68/lang.el), περίσφιξη υποστυλώματος
- [8] <http://www.choromonotiki.gr/4.SYNTHETA-YLIKA-STATIKON-ENISXYSEON.pdf>, φωτογραφικό υλικό
- [9] [http://www.sp-reinforcement.ch/pdf/kap\\_12us.pdf](http://www.sp-reinforcement.ch/pdf/kap_12us.pdf), φωτογραφικό υλικό
- [10] [http://www.wvdot.com/3\\_roadways/rp/RSS%20PDFS/WV25.pdf](http://www.wvdot.com/3_roadways/rp/RSS%20PDFS/WV25.pdf), φωτογραφικό υλικό
- [11] <http://www.episkeves.civil.upatras.gr/ergasies%202006/15%20REZOY.pdf>, φωτογραφικό υλικό.